青藏高原及周边地区的冰川灾害

邬光剑[1,2*] 姚檀栋[1,2,3] 王伟财[1,2] 赵华标[1,2] 杨 威[1,2] 张国庆[1,2] 李生海[1,2] 余武生[1,2] 类延斌[1,2] 胡文涛[1]

1 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原环境变化与地表过程重点实验室 北京 100101
2 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101
3 兰州大学 兰州 730000

chinaXiv:202303.10184v1

摘要 青藏高原及周边地区是除南、北两极地区之外全球最重要的冰川资源富集地。在全球变暖背景下，中国冰川整体处于快速退缩状态，这不仅影响水资源储备，而且伴生了相应的冰川灾害，如冰崩、冰川跃动、冰湖溃决洪水、冰川泥石流等。这些冰川灾害的发生具有各自的时空分布规律、发生机理和灾害过程。总体上，气候变暖、变湿导致冰川不稳定性增加，进而导致冰川灾害风险的发生。从统计结果来看，近期气候变暖使得这些灾害表现出增加的趋势。特别是极大陆型冰川和海洋型冰川都出现了冰崩灾害，可能表明青藏高原的冰川在整体上已经处于不稳定状态。并且，随着气候变暖的持续和人类活动强度的增加，青藏高原及周边地区冰川灾害的风险程度也在加剧。

关键词 冰川变化，气候变暖，冰川灾害，灾害风险

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.011

中国是全球中、低纬地区冰川最为发育的国家。在全球变暖背景下，中国的冰川整体上处于加速消融状态，不仅表现出快速退缩和减薄，而且冰川自身的不稳定性增大，从而导致伴生的灾害风险加剧。冰川灾害与冰川变化密切相关。这些冰川灾害危及当地居民的生命和财产安全，破坏交通道路、基础设施、重要工程等。因此，开展冰川灾害研究，对阐明气候变化对冰川的影响，揭示冰川灾害的发生过程和机理，预估未来变化趋势，以及提出积极的应对措施，具有重要的科学与社会意义。

1 中国冰川近期变化

中国是世界冰川资源大国，冰川资源主要分布在青藏高原及周边地区。这些冰川分为海洋型冰川（占中国冰川面积的22%，分布于青藏高原东南部）、亚大陆型冰川（占中国冰川面积的46%，分布在青藏高

*通讯作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20060200），第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0201），国家自然科学基金（41725001）

修改稿收到日期：2019年10月16日

ChinaXiv合作期刊

原东北部及高原南缘和天山）、极大陆型冰川（占中国冰川面积的32%，主要分布在青藏高原西部）等3类[1]。根据中国第一次冰川编目资料统计，中国境内冰川共计46 377条，总面积59 425 km^2[2]。根据《中国第二次冰川编目》，中国境内面积超过0.01 km^{2}的冰川共有48 571条，总面积达51 766 km^2，总储量约4.5×10^{12} m^3[3]。

卫星遥感资料和实地观测研究均显示，在全球变暖背景下，青藏高原及周边地区冰川整体上处于快速消融状态。根据《中国第二次冰川编目》与《中国第一次冰川编目》数据对比，中国境内冰川面积缩小约18%，储量减少约20%[3]。通过系统分析青藏高原及周边地区现有的冰川面积、末端位置、物质平衡变化数据，发现1990—2010年这一地区冰川变化呈现明显的空间差异[4]，具体表现为：藏东南地区冰量亏损及面积萎缩幅度最大；其次为喜马拉雅山南缘；在青藏高原腹地冰川面积和末端退缩幅度相对较小，冰川物质亏损相对较弱；而在帕米尔—喀喇昆仑—西昆仑地区，冰川退缩程度最小，部分冰川甚至前进，表现出微弱的物质盈余。冰川厚度变化（2000—2016年）显示出，藏东南地区、横断山及天山地区出现了较明显的冰量亏损，而西昆仑地区的冰川呈现出微弱的正平衡及冰量增加的趋势[5]。

最近研究表明，天山地区年均气温以0.3℃/10 a的速率增加[6]。天山地区12 386 km^2（RGI 6.0数据）的冰川正在强烈退缩，其中98%的冰川为面积小于1 km^{2}的小冰川，约有97.5%冰川表现出退缩，尤其是在其北部和中部地区。根据两次中国冰川编目的数据，发现近50年来中国境内的天山冰川面积减少了18%[7]。冰川的快速变化降低冰川自身的稳定性，进而导致冰川灾害的发生风险增加。

2 中国冰川灾害类型、空间分布与成因

青藏高原及周边地区冰川灾害的类型包括冰崩、冰川跃动、冰湖溃决洪水、冰川泥石流、冰雪洪水等。不同气候区、不同冰川类型和不同的地质地形条件，使得不同类型冰川灾害的地理分布、发生过程和机理、灾害风险和影响程度也不尽相同。部分冰川灾害还将引发次生灾害，形成一个从冰冻圈开始，影响到岩石圈、水圈、生物圈、人类圈的灾害链，延长和放大了灾害后果。

2.1 冰崩

冰崩指在坡度较大斜坡上大块冰体甚至整条冰川在重力作用下沿着冰川内部的某一剪切破裂面或脆弱面，脱离母体而迅速倾倒或滑塌、坠落的现象，是最激烈的冰川灾害形式。在*The Physics of Glaciers*（《冰川物理学》）第四版中，设置了*Glacier Surges*（《冰川跃动》）一章，并在这一章中单独开辟了一节“*Ice avalanche*”（冰崩），专门说明“冰崩”与“冰川跃动”是不同的。冰川跃动具有周期性且运动较为缓慢的特征，但冰崩则是冰川大部分冰体（超过50%）在短时间内迅速垮塌。全球高海拔冰川分布区均发生过冰崩灾害，如阿尔卑斯山脉的Allalin冰崩、安第斯山脉的Huascaran冰崩、高加索山脉的Kolka-Karmadon冰崩等[8]。

冰崩发生的原因是冰川在坡度较大的坡面断裂，在重力作用下失稳而引发冰块崩解、坍塌。目前青藏高原上已报道的冰崩灾害主要发生在西北部的西昆仑和藏东南一带。2016年7月17日，阿里地区的阿汝错流域的53号冰川发生大规模崩塌事件，形成了7×10^7 m^{3}的冰崩堆积体，部分冰崩物质甚至冲进了阿汝错，形成湖涌。此次冰崩导致9名当地牧民遇难。同年9月21日，相邻的阿汝50号冰川再次发生冰崩事件，形成的堆积体体积约1×10^8 m^3[9]。若冰崩发生的海拔较高，还能够进一步诱发冰碛物碎屑流、冰川泥石流、冰湖溃决等次生灾害。在2018年10月17日和29日，藏东南地区雅鲁藏布江大拐弯处的色东普沟，连续发生冰崩堵江事件；冰崩体刮铲沟谷中松散

chinaXiv:202303.10184v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10184v1

的冰碛物，在重力作用下形成碎屑流，向下运动并堆积在雅鲁藏布江河谷中，堵塞河道，形成堰塞湖[10]。2013年西藏嘉黎县“7·5”冰湖溃决洪水，可能是雪崩和冰崩的共同作用直接诱发的[11]。

引起冰崩发生的主要因素包括气候、地形、冰体热力状况、基岩的不稳定性及地震活动等。全球气候变暖逐渐被发现可能是引发冰崩灾害的深层次原因。变暖导致冰川热力性质发生变化，最初的冷性冰川转变为多温结构甚至温性冰川，减少了冰床与下伏基岩的摩擦力，增加了冰川滑动与断裂的概率，同时也使得冰体的剪切强度降低，改变冰川在重力作用下的运动速度，增加了冰体快速运动的可能性。对于阿汝冰崩，冰川基底由软性岩层组成，有利于冰川的运动[10]；而对于色东普沟的冰崩，虽然冰川发育在坚硬岩体（主要岩性为斜长片麻岩、二长片麻岩、钙硅酸岩等）上，但因为地形陡峭，易于发生崩塌。地震同样也可以引起冰崩的发生。例如，1962 年 1 月和 1970 年 5 月，秘鲁 Nevados Huascaran 山上的冰川 2 次因地震而突然发生断裂，引发冰崩[12]。此外，极端强降水或极端温暖期的强烈冰川融化，使得较多的液态水通过冰裂隙到达冰川基底，改变了冰下排水系统与冰体结构稳定性，导致冰崩的发生。

2.2 冰川跃动

冰川跃动是一种特殊的冰川运动现象，是冰川不稳定性的另一种特殊表现形式，它是指冰川在数天或数十天内以超出正常运动速度数十倍甚至数百倍以上的速度快速前进。冰川跃动，一类是在气候寒冷条件下，由冰下压力增高发生压融并润滑冰川导致跃动；另一类是在气候较温暖条件下，由冰川融水向下迁移导致冰下静水压力升高而润滑产生跃动。冰川跃动大多数分布在冰川的冰川末端部位，是稳定期与跃动期相互交替的周期性运动，往往会经历漫长的稳定期与短暂的跃动期。对喀喇昆仑山地区 5 条跃动冰川的连续监测表明，每一次冰川跃动需要数年的积累时间[13]。

青藏高原及周边地区冰川跃动主要发生于喀喇昆仑山、喜马拉雅山和藏东南地区。冰川表面运动速度的提取结果显示，喀喇昆仑地区冰川非常活跃，末端前进速度可达每年数百米。基于 Landsat 遥感影像数据及历史考察制图，发现喀喇昆仑山地区 2 条冰川末端的最大运动速度分别可达 272 m/a 和 213 m/a，符合跃动冰川的运动特征[14]。20 世纪 90 年代以来，喀喇昆仑山冰川冰温升高，冰川流速加快，冰湖溃决洪水的洪峰流量逐年加大，导致突发洪水的危险程度越来越大。

2.3 冰湖溃决洪水

冰湖是以现代冰川融水为主要补给源或在冰碛垄洼地内积水形成的天然水体，包括冰川末端湖、冰川表面湖、冰川补给湖等类型。青藏高原及周边地区的冰湖分布广泛，在冰川发育区几乎都有存在，但集中分布在念青唐古拉山和喜马拉雅山地区。冰湖溃决洪水是由冰川成因湖泊快速的大量排水或坝体垮塌而形成的突发性洪水。冰湖溃决洪水主要发生在喜马拉雅山、喀喇昆仑山的叶尔羌河和天山的阿克苏河源区。发生溃决的冰湖主要分为冰川阻塞湖（冰坝湖）和冰碛阻塞湖（冰碛湖）两大类，其中冰碛湖堤溃决过程主要有溢流型和管涌型 2 种机制。麦兹巴赫湖属于典型的冰川阻塞湖，在冰川融水蓄积达到一定水深（或水压）时，形成周期性突发洪水[15]。

冰湖空间分布及动态变化研究对评估冰湖溃决危险性具有重要意义。青藏高原地区大于 0.003 km^2 的冰湖共有 5 701 个（2010 年数据），总面积 682.4±110 km^2，其中危险性冰湖主要分布在喜马拉雅山、念青唐古拉山东部及横断山地区[16]。冰湖的潜在危害程度与其面积有关，只有较大面积的冰湖能够造成严重的灾害。青藏高原上面积大于 0.1 km^2 的冰湖共有 1 291 个；其中，210 个威胁到人类定居点，具有极高危险性的冰湖有 30 个，集中分布在喜马拉雅山中

ChinaXiv合作期刊

段的吉隆县、聂拉木县和定日县[17]。

通过对冰湖溃决灾害事件文献及资料整理，系统梳理了20世纪以来西藏地区发生的27次冰湖溃决事件[18]。其中，喜马拉雅山中段是冰湖突发性洪水高发区之一。这里的冰湖主要属于冰碛阻塞湖，约占这一带各类高山湖泊总数的1/2和总蓄水量的2/3。冰湖溃决往往引发严重的灾害。1981年7月11日，位于喜马拉雅南坡聂拉木县樟藏布沟内的次仁玛错冰碛阻塞湖发生漫溢溃决，溃决洪水摧毁了沿途的道路、桥梁、电站，造成下游尼泊尔境内200多人死亡和失踪[19]。根据报道，2013年7月5日，发生在西藏自治区嘉黎县忠玉乡的冰湖溃决，是我国境内最近一次有人员失踪的冰湖溃决洪水灾害事件[11]。

2.4 冰川泥石流

冰川泥石流是指在高山冰川环境下由冰川洪水与冰川或其他寒冻风化沉积物所形成的特殊泥砂径流。冰川泥石流是一种与冰川运动密切相关的灾害现象，常伴随着瞬间爆发、运动速度快（可达200 km/h）、运动距离远（可波及数十公里）、规模大（体积可达百万立方米）的特征[20]。冰川泥石流的主要形成条件包括陡峻的冰川沟谷地形、丰富的松散冰碛物或冰水沉积物，以及充足的冰雪融水或冰湖溃决洪水。

青藏高原及周边地区现代冰川泥石流主要分布在冰川急剧消退的高山山区。根据冰川类型和泥石流发育程度，冰川泥石流分为3个区域：① 海洋型冰川泥石流区，包括念青唐古拉山至横断山及喜马拉雅山南坡等海洋型冰川分布区，充足的固态物质和水源使得该区泥石流频发；② 亚大陆型冰川泥石流区，包括喀喇昆仑山、阿尔泰山、中国西天山、祁连山东段及喜马拉雅山北坡等，以冰湖溃决型泥石流为特色；③ 极大陆型冰川泥石流区，包括天山东段、祁连山西段、昆仑山和青藏高原北部，泥石流分布稀疏且规模小[21]。根据冰川泥石流的水源补给方式，又可分为冰川融水型泥石流（由冰川、积雪强烈消融洪水导致）、冰湖溃决型泥石流和冰崩雪崩型泥石流。对于同一条冰川泥石流沟，几种类型的泥石流也有可能交错出现。

对于冰川泥石流来说，冰雪消融的水源补给是必不可少的条件，因此温度和降水是与冰川泥石流发生直接相关的2个气象因素。暖湿气候最有利于大型冰川泥石流暴发[22]。在藏东南地区，这里受季风气候影响明显，年均降水量要远高于高原其他地区，是海洋型冰川发育中心，而且区域内多为高山峡谷地貌，大多数沟谷地势落差超过2 000 m，使得这一地区成为冰川泥石流的频发区。

3 主要冰川灾害的近期变化趋势

3.1 气候整体上的变暖、变湿导致冰川灾害增加

从整体上看，冰川主要发育区的青藏高原和天山地区，这些地区近期气候变化的主要特征是变暖、变湿。近50年来青藏高原的变暖幅度超过全球同期平均升温率的2倍，达到每10年0.3℃—0.4℃；而降水量总体呈现增加趋势，每10年增加2.2%[23]。天山山区多年平均降水量在近50年来整体上呈增加的趋势，增加速率约为0.13 mm/a；而气温自1961年以来，一直处于升温状态，速率为0.027℃/a[24]。

“变暖”增强了冰川融化，使得冰体温度升高；而“变湿”则增大冰川的物质积累，加快冰川运动速度。在气候变暖背景下，过去相对稳定而且运动速度相对缓慢的冰川，已经变得更加不稳定，并有可能出现大幅度的剧烈运动和强烈的消融，进而导致各种冰川灾害的发生。2016年和2018年，在西藏阿里地区和藏东南地区都发生了大规模的冰崩事件。阿里地区位于西藏自治区西北部，该区冰川以极大陆型冰川类型为主，一般认为这一类型的冰川较为稳定，对气候变化的敏感性差；而藏东南地区是海洋型冰川发育中心，冰川呈现高消融和高积累的水分转换特征，冰川冰温

chinaXiv:202303.10184v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10184v1

较高而且运动速度快。这 2 种类型截然不同的冰川连续发生冰崩灾害事件，很可能说明目前青藏高原的冰川整体上处于不稳定状态，灾害发生概率与空间范围正逐渐增大。通过 Landsat 遥感影像，提取了1990—2015 年喀喇昆仑山 27 条冰川逐年的运动速度，发现冰川跃动发生的第一个集中时段是 1992—1996 年，第二个集中时段是 2004—2008 年，而且第二个时段的冰川跃动总体频率与第一时段相比更高。整体来说，1990—2015 年间喀喇昆仑山跃动冰川的发生有准周期性规律，并且跃动冰川的发生频率呈升高趋势[25]。

近期的气候变暖加剧了冰川消融，使得冰湖出现了数量增多、面积增大的趋势。根据统计，喜马拉雅地区面积大于 0.0081 km^2 的冰湖数量，从 1990 年的 4 549 个增加到 2015 年的 4 950 个，冰湖总面积增大了约 14%[26]。而在整个第三极地区，冰湖（面积>0.003 km^2）的数量从 1990 年的 4 602 个增加到 2010 年的 5 701 个，而总面积则从 553.9 km^2 增加到 682.4 km^2；与冰川相连的冰湖因为冰川融水增多，面积增加更大且更快[16]。未来一段时间内，帕隆藏布流域的冰湖溃决可能处于活跃阶段，其形成和暴发也将更加频繁[27]。在兴都库什—喜马拉雅地区，冰湖数量增加，面积扩张，这一趋势近期还将持续，但近期冰湖溃决洪水的频率是否在增加还缺乏明确的结论[28]。有观点认为 20 世纪 80 年代以来，喜马拉雅山地区冰湖溃决洪水的发生频率没有发生变化[29]。冰湖扩张导致冰湖水量的增加，这就增大了溃决的可能性以及溃决后的洪水总量和洪峰流量，进而增大了危害程度。因此，由于冰湖在数量上和面积上的增加，表明其溃决的风险程度在增加。

在藏东南地区，冰川的强烈消融发生在夏季，而此时也是降水集中的季节，二者的叠加增强了供水强度，有利于冰川泥石流的发生。伴随着气温升高，冰川消融退缩加强，夏季冰雪融水的供给量也会增加，有利于激发泥石流的发生。同时，变暖也使得冰川热力性质改变，这为大规模冰块的崩塌和冰湖溃决提供了重要条件；变暖还引起冰川侧面岩石的压力环境产生变化，容易发生冰崩或冰湖溃决，进而诱发冰川泥石流[30]。整体来看，变暖使得冰川泥石流趋于活跃，呈现暴发频度增加的趋势[22]。

从青藏高原冰川灾害的统计结果来看，近期冰湖溃决洪水事件[31]、冰川跃动事件[26]、冰川泥石流事件[32]均有增加的趋势，而冰崩则是近期出现的新型灾冰川害。因此，从整体上看，近期青藏高原及周边地区的冰川灾害呈现出增多的趋势。

3.2 人类活动增加了冰川灾害风险

冰川灾害的危害程度与人类活动的强度相关。随着社会经济的发展，即使在偏远地区，放牧活动、基础设施建设、道路交通、重大工程建设等都在发展，人类活动越来越接近冰川活动的影响区，邻近冰川区的人类活动也在增强。

以我国西藏自治区为例，其冰川数量（21 863 条）和面积（23 795.78 km^2）居全国第一位。全区常住人口从 2000 年的 258 万增加到 2018 年的 344 万，而乡村人口从 1980 年的 154.2 万增加到 2017 年的 233 万（国家统计局数据），这就增加了冰川灾害的潜在危险。青藏高原上溃决风险较高的冰湖主要分布在藏东南一带，但溃决危险较高的冰湖则主要分布在喜马拉雅山中段的吉隆、聂拉木和定日一带，其原因是冰湖溃决造成的潜在社会损失与这一地区的人类活动更易受冰川影响有关。人类活动的增强，特别是一些居民集聚区和交通干线区与冰川灾害频发区重叠，增加了冰川灾害的危险。

3.3 冰川灾害的应对

近期的气候变化使得冰川灾害的风险增加，需要采取相应的科学对策。首先，需要通过详细的资料收集和整理，厘清冰川灾害的区域分布特征和发生规律；其次，加强冰川变化和冰川灾害的监测研究，揭示灾害的动力学过程和机理，评估冰川灾害的风险；

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10184v1

最后，应当采取积极的监测预警和防控措施。这些措施包括：

（1）构建冰川灾害综合防控体系。在藏东南、喜马拉雅山中段等冰川灾害频发区建立冰崩、冰湖溃决监测预警体系，完善灾害预警预报、风险处置、防灾减灾、群测群防、应急救助和灾后恢复重建等灾害防治关键环节，形成冰川灾害综合风险管控体系。

（2）提高对各类灾害调控能力。针对冰崩、冰湖溃决、冰川泥石流等灾害，开展系统的冰川灾害风险调查评估，研发重大工程区和交通干线区的风险防控关键技术，制定川藏铁路、川藏公路、中巴公路等主要交通干线冰川灾害风险防范预案。同时，在青藏高原国家重大工程的论证决策、勘察设计、项目实施全过程中，统筹考虑冰川灾害影响，采取相应工程措施，提升工程冰川灾害防范能力。

（3）提高基础设施建设防灾抗灾标准。尤其是在城镇、重要交通干线和重大工程区域，要提高房屋、公路、铁路、输油管道、电讯等基础设施建设防灾抗灾标准。

4 结语

根据第 5 次耦合模式比较计划模拟结果，在未来温室气体中等排放情景（RCP4.5）下，相对于1960—1990年的基准值，青藏高原气温到2050年可能将上升3.2℃；而在全球温室气体高排放情景（RCP8.5）下，升温幅度将达3.5℃；在温室气体中等排放和高排放背景下，到2100年青藏高原的升温幅度可分别达3.9℃和6.9℃[23]。随着气候变暖的持续，青藏高原上冰川的不稳定性增加，相应冰川灾害的风险也将增大。

目前，我们对冰川灾害的孕灾环境、灾害过程以及发生机理仍然认识不足，也缺乏有效的应急和防灾手段。第二次青藏高原综合科学考察中冰川变化及冰川灾害是重要的科考内容之一。借助这一机会，开展冰川变化与冰川灾害研究，揭示冰川变化和冰川灾害的发生机理，提出科学应对方案，这不仅将产出面向科学前沿的冰川灾害机理研究成果，也将服务于面向国家需求和地方发展的冰川灾害监测预警。

参考文献

1 施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估. 科学通报, 2000, 45(4): 434-438.

2 施雅风. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.

3 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.

4 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2: 663-667.

5 Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. Nature Geoscience, 2017, 10: 668-673.

6 Chen Y, Li W, Deng H, et al. Changes in central Asia's Water Tower: Past, present and future. Scientific Reports, 2016, 6: 35458.

7 邢武成, 李忠勤, 张慧, 等. 1959年来中国天山冰川资源时空变化. 地理学报, 2017, 72: 1594-1605.

8 胡文涛, 姚檀栋, 余武生, 等. 高亚洲地区冰崩灾害的研究进展. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1141-1152.

9 Kääb A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. Nature Geoscience, 2018, 11: 114-120.

10 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究. 中国地质, 2019, 46(2): 219-234.

11 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 2013年西藏嘉黎县"7.5"冰湖溃决洪水成因及潜在危害. 冰川冻土, 2014, 36(1): 158-165.

12 Ericksen G, Plafker G, Concha J. Preliminary report on the geologic events associated with the May 31, 1970, Peru

earthquake. US Geological Survey Circular, 1970, 639: 1-25.

13 Quincey D, Braun M, Glasser N, et al. Karakoram glacier surge dynamics. Geophysical Research Letters, 2011, 38(18): 113-120.

14 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 喀喇昆仑山克勒青河谷近年来发现有跃动冰川. 冰川冻土, 2005, 27(5): 641-644.

15 Shangguan D, Ding Y, Liu S, et al. Quick release of internal water storage in a glacier leads to underestimation of the hazard potential of glacial lake outburst floods from Lake Merzbacher in Central Tian Shan Mountains. Geophysical Research Letters, 2017, 44(19): 9786-9795.

16 Zhang G, Yao T, Xie H, et al. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. Global Planet Change, 2015, 131: 148-157.

17 Allen S K, Zhang G Q, Wang W C, et al. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach. Science Bulletin, 2019, 64(7): 435-445.

18 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1377-1390.

19 程尊兰, 朱平一, 宫怡文. 典型冰湖溃决型泥石流形成机制分析. 山地学报, 2003, 21(6): 716-720.

20 Chiarle M, Iannotti S, Mortara G, et al. Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. Global and Planetary Change, 2007, 56: 123-136.

21 李鸿琏, 蔡祥兴. 中国冰川泥石流的一些特征. 水土保持通报, 1989, 9(6): 1-9.

22 崔鹏. 我国泥石流防治发展趋势与对策. 地理教育, 2014, 6: 1.

23 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60: 3025-3035.

24 邓海军, 陈亚宁, 陈忠升. 增温增湿环境下天山山区降雪量变化. 地理科学, 2018, 38(11): 1933-1942.

25 许艾文. 近40年中国喀喇昆仑山冰川变化的遥感监测. 兰州: 兰州大学, 2017.

26 Nie Y, Sheng Y, Liu Q, et al. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. Remote Sensing of Environment, 2017, 189: 1-13.

27 刘娟, 姚晓军, 高永鹏, 等. 帕隆藏布流域冰湖变化及危险性评估. 湖泊科学, 2019, 31(4): 1132-1143.

28 Wester P, Mishra A, Mukherji A, et al. The Hindu Kush Himalaya Assessment-Mountains, Climate Change, Sustainability and People. Basel: Springer Nature Switzerland AG, 2019.

29 Veh G, Korup O, von Specht S, et al. Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalaya. Nature Climate Change, 2019, 9: 379-383.

30 Huggel C, Kääb A, Haeberli W, et al. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake out bursts: Evaluation and application in the Swiss Alps. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, 3: 647-662.

31 程尊兰, 朱平一, 党超, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势. 冰川冻土, 2008, 30(6): 954-959.

32 沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害. 冰川冻土, 2009, 31(6): 993-1002.

chinaXiv:202303.10184v1

ChinaXiv合作期刊

Glacial Hazards on Tibetan Plateau and Surrounding Alpines

WU Guangjian[1,2*] YAO Tandong[1,2,3] WANG Weicai[1,2] ZHAO Huabiao[1,2] YANG Wei[1,2] ZHANG Guoqing[1,2]
LI Shenghai[1,2] YU Wusheng[1,2] LEI Yanbin[1,2] HU Wentao[1]
（1 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China;
2 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;
3 Lanzou University, Lanzou 730000, China）

Abstract The Tibetan Plateau and surrounding mountains contain the largest glacier storage outsides the north and south polar regions. Under the global warming, recently glaciers in China are generally experiencing rapid melting and shrinkage. This rapid glacier change impacts the water resource that supplied by melt-water, and also favors glacial hazards, such as glacier collapse, glacier surging, glacial debris flow, and glacial lake outburst flood. Those glacial hazards show their spatio-temporal distribution characters, dynamic processes and mechanisms. Accompanying with the recent rapid glacier change, which reduces the glacier stability by warming, glacial hazards become more frequent. Furthermore, since global warming continues and human activity intensifies, the uncertainty and risk of glacial disasters will intensify. Therefore, scientific solution and countermeasures are needed based on the researches on glacial changes and hazards.

Keywords glacier change, warming, glacial hazards, disaster risk



邬光剑 中国科学院青藏高原研究所研究员，博士生导师；中国科学院高山环境综合观测研究站站长。主要从事冰芯气候记录与冰川变化研究。E-mail: wugj@itpcas.ac.cn

WU Guangjian Ph.D., Professor of Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Director of South-East Tibetan Plateau Station for integrated observation and research of Alpine Environment, CAS. Prof. Wu's main research has been focusing on ice core paleoclimatic record and glacier change on the Tibetan Plateau. E-mail: wugj@itpcas.ac.cn

* Corresponding author

■责任编辑：岳凌生

chinaXiv:202303.10184v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10184v1

参考文献（双语版）

1 施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估. 科学通报, 2000, 45(4): 434-438.

Shi Y F, Liu S Y. Projection of the response of Chinese glaciers to global warming in the 21st century. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(4): 434-438. (in Chinese)

2 施雅风. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.

Shi Y F. Concise Chinese Glacier Catalog. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005. (in Chinese)

3 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.

Liu S Y, Yao X J, Guo W Q, et al. The contemporary glaciers in China based on the second Chinese glacier inventory. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16. (in Chinese)

4 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, (2): 663-667.

5 Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. Nature Geoscience, 2017, 10(9): 668-673.

6 Chen Y, Li W, Deng H, et al. Changes in central Asia's Water Tower: Past, present and future. Scientific Reports, 2016, (6): 35458.

7 邢武成, 李忠勤, 张慧, 等. 1959年来中国天山冰川资源时空变化. 地理学报, 2017, 72(9): 1594-1605.

Xing W C, Li Z Q, Zhang H, et al. Spatial-temporal variation of glacier resources in Chinese Tianshan Mountains since 1959. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(9): 1594-1605. (in Chinese)

8 胡文涛, 姚檀栋, 余武生, 等. 高亚洲地区冰崩灾害的研究进展. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1141-1152.

Hu W T, Yao T D, Yu W S, et al. Advances in the study of glacier avalanches in High Asia. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1141-1152. (in Chinese)

9 Kääb A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. Nature Geoscience, 2018, 11: 114-120.

10 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究. 中国地质, 2019, 46(2): 219-234.

Liu C Z, Lyu J T, Tong L Q, et al. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet. Geology in China, 2019, 46(2): 219-234. (in Chinese)

11 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 2013年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害. 冰川冻土, 2014, 36(1): 158-165.

Sun M P, Liu S Y, Yao X J, et al. The cause and potential hazard of glacial lake outburst flood occurred on July 5, 2013 in Jiali County, Tibet. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 158-165. (in Chinese)

12 Ericksen G, Plafker G, Concha J. Preliminary report on the geologic events associated with the May 31, 1970, Peru earthquake. US Geological Survey Circular, 1970, 639: 1-25.

13 Quincey D J, Braun M, Glasser N F, et al. Karakoram glacier surge dynamics. Geophysical Research Letters, 2011, 38(18): 113-120.

14 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 喀喇昆仑山克勒青河谷近年来发现有跃动冰川. 冰川冻土, 2005, 27(5): 641-644.

Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. Surging glacier found in Shaksgam River, Karakorum Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 641-644. (in Chinese)

15 Shangguan D, Ding Y, Liu S, et al. Quick release of internal water storage in a glacier leads to underestimation of the hazard potential of glacial lake outburst floods from Lake Merzbacher in Central Tian Shan Mountains. Geophysical

ChinaXiv合作期刊

Research Letters, 2017, 44(19): 9786-9795.

16 Zhang G, Yao T, Xie H, et al. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. Global Planet Change, 2015, 131: 148-157.

17 Allen S K, Zhang G Q, Wang W C, et al. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach. Science Bulletin, 2019, 64(7): 435-445.

18 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1377-1390.

Yao X J, Liu S Y, Sun M P, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century. Journal of Natural Resources, 2014, 29(8): 1377-1390. (in Chinese)

19 程尊兰, 朱平一, 宫怡文. 典型冰湖溃决型泥石流形成机制分析. 山地学报, 2003, 21(6): 716-720.

Cheng Z L, Zhu P Y, Gong Y W. Typical debris flow triggered by ice-lake break. Journal of Mountain Research, 2003, 21(6): 716-720. (in Chinese)

20 Chiarle M, Iannotti S, Mortara G, et al. Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. Global and Planetary Change, 2007, 56(1-2): 123-136.

21 李鸿琏, 蔡祥兴. 中国冰川泥石流的一些特征. 水土保持通报, 1989, 9(6): 1-9.

Li H L, Cai X X. The glacial debris flow of China. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(6): 1-9. (in Chinese)

22 崔鹏. 我国泥石流防治发展趋势与对策. 地理教育, 2014, 6: 1.

Cui P. Development trend and countermeasures of debris flow prevention and control in China. Education of Geography, 2014, 6: 1. (in Chinese)

23 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60: 3025-3035.

Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2015, 60: 3025-3035. (in Chinese)

24 邓海军, 陈亚宁, 陈忠升. 增温增湿环境下天山山区降雪量变化. 地理科学, 2018, 38(11): 1933-1942.

Deng H J, Chen Y N, Chen Z S. Changes of snowfall under warmer and wetter in the Tianshan Mountains. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(11): 1933-1942. (in Chinese)

25 许艾文. 近40年中国喀喇昆仑山冰川变化的遥感监测. 兰州: 兰州大学, 2017.

Xu A W. Monitoring glacier change based on remote sensing in China Karakoram for the last four decades. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)

26 Nie Y, Sheng Y, Liu Q, et al. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. Remote Sensing of Environment, 2017, 189: 1-13.

27 刘娟, 姚晓军, 高永鹏, 等. 帕隆藏布流域冰湖变化及危险性评估. 湖泊科学, 2019, 31(4): 1132-1143.

Liu J, Yao X J, Gao Y P, et al. Glacial lake variation and hazard assessment of glacial lakes outburst in the Parlung Zangbo River Basin. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 1132-1143. (in Chinese)

28 Wester P, Mishra A, Mukherji A, et al. The Hindu Kush Himalaya Assessment-Mountains, Climate Change, Sustainability and People. Basel: Springer Nature Switzerland AG, 2019.

29 Veh G, Korup O, von Specht S, et al. Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalaya. Nature Climate Change, 2019, 9: 379-383.

30 Huggel C, Kääb A, Haeberli W, et al. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake out bursts: Evaluation and application in the Swiss Alps. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, 3: 647-662.

31 程尊兰, 朱平一, 党超, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势. 冰川冻土, 2008, 30(6): 954-959.

chinaXiv:202303.10184v1

ChinaXiv合作期刊

Cheng Z L, Zhu P Y, Dang C, et al. Hazards of debris flow due to glacier-lake outburst in southeastern Tibet. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6): 954-959. (in Chinese)

32 沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害. 冰川冻土, 2009, 31(6): 993-1002.

Shen Y P, Wang G Y, Ding Y J, et al. Changes in Merzbacher Lake of Inylchek glacier and glacial flash floods in Aksu River Basin, Tianshan during the period of 1903-2009. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(6): 993-1002. (in Chinese)

chinaXiv:202303.10184v1